

博士論文概要

論文題目

シールドトンネルへの性能照査型 設計法の適用に関する研究

On the Application of the Performance-Based Design to Shield Tunnels

氏 名	申 請 者	
	吉 本	正 浩
	Masahiro	Yoshimoto

2005年 2月

送電用ケーブルを収容する地中線土木設備は、シールドトンネルや立坑等から成っており、首都圏のエネルギーの安定供給を担う重要な電力設備である。これらは、エネルギー需要の伸びにあわせて昭和 30 年代より計画的に建設されてきた。現在では首都圏をはじめとする大都市域の地下部に多くの電力施設が整備され、生活、文化、経済活動を支えている。

一方、近年のシールドトンネルの設計には、施工時や地震時の損傷に対する安全性の保証や供用期間中の維持管理費用の削減など、新たな観点が要求されている。これらの要求に対し、トンネルがそれを満足することを精度よく検証できる設計法があれば、経済的かつ信頼性の高い設備計画が可能になる。また、最近では電力自由化の動きがあり、電力設備の建設においても、その安定供給と建設コストの縮減との両立が要求されている。

性能照査型の設計法は、構造物の機能を確保する種々の性能を明記し、それを構造物が満たすことを照査する設計法である。シールドトンネルの設計に性能照査型の設計法を導入する主な利点は、トンネル構造の合理化と設計の信頼性の向上にある。言い換えれば、必要最小限のトンネルの構造を設計した場合に、そのトンネルが各種の荷重条件に対して、どの程度安全であるのかを明確にできることにある。

本研究はこのような状況を背景として、性能照査型の設計法を地中送電用のシールドトンネルに適用する方法を検討したものであり、とくに、シールドトンネルの一次覆工である鉄筋コンクリート製セグメント(以下 R C セグメントと呼ぶ)を対象にして、性能照査型設計法の実際の適用手順などを具体的に明示している。

研究は大きく 3 つの部分からなる。第 1 の部分はシールドトンネルの性能照査型の設計体系を定めることを目的とした部分である。まず、シールドトンネルの荷重条件を 5 種類に区分し、その荷重条件ごとに地中送電用のトンネルに求められる耐荷性能、変形性能、止水性能および耐久性能を定めた。また、これらの性能を満足する照査の項目と限界値を示し、設計法の実用化のために、すべての限界値の算定方法および安全係数を明確に定めた。次に、精度の高い照査のためにはトンネルの発生断面力や変形量などの応答値も高い算定精度が必要になる。このため、すべての荷重条件に対して、トンネルの応答値を精度よく算定できる構造解析手法を選定している。さらに、性能照査型の設計法を実務に適用するために、実際の工事における検査方法と設計理論との整合を図った。

第 2 の部分は施工時荷重の照査の考え方を示すことを目的とした部分である。まず、既往の施工記録の分析を行い、その結果として、施工時におけるシールドジャッキの推力とテールシール圧とが R C セグメントに損傷を与える可能性が高いことを示した。次に、R C セグメントの組立状態に目違いや目開きなどがない場合とある場合とに分け、それらがいない場合は模型実験結果を行って、その結果

をもとに、ジャッキ推力の影響に対する照査方法を示した。また、目違いや目開きなどがある場合は、実工事におけるそれらの程度と模型実験における損傷の状況とを比較勘案して、ジャッキ推力の影響に対する設計上の考え方を示した。また、テールシール圧の影響に関しては、実現場の荷重計測記録から荷重の特性値を算定して、それをもとに構造計算を行ってRCセグメントの損傷状態を推定し、損傷を防止するために必要な設計上の考え方を示した。

第3の部分は地中送電用シールドトンネルの耐久性の照査方法を示すことが目的の部分である。具体的には、耐久性を保証する設計方法として、RCセグメントの構造細目と曲げひび割れ幅の制御方法とを既設トンネルの劣化調査結果に基づいて、提案している。構造細目に関しては、主鉄筋を配力鉄筋よりもセグメント本体断面の内側に配筋することを原則にした上で、耐久性を保証するかぶりの厚さを内陸性環境と海洋性環境条件とに分けて定め、一方、土水圧等の永久荷重作用時に曲げひび割れが原因で生じる配力鉄筋の腐食に対して、許容できるひび割れ幅を内陸性環境と海洋性環境とに分けて定めている。

本論文は全部で9章から構成される。各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論である。ここでは電力設備としてのシールドトンネルの果たす役割を述べ、性能照査型の設計法の導入に至る背景やその目的について記述している。また、性能照査型の設計法を実用化するにあたっての課題を整理し、それらを本研究の検討課題として示している。

第2章では性能照査型の設計法の体系に必要な荷重条件、トンネルの性能および設計書式について論じている。まず、荷重条件は、常時、異常時、施工時、レベル1地震時およびレベル2地震時の5種類に区分した。これらの荷重条件はそれぞれに大きさや発生頻度が異なるので、トンネルに求める性能は各荷重条件ごとに別個に定めた。また、これらの性能を照査する設計書式には限界状態設計法と部分安全係数とを採用することとした。

第3章では異常時の荷重の考え方と設定方法について論じている。異常時の荷重とは作用する確率は低いが発生すれば長期的に作用する荷重である。例えば、不測の地盤沈下などが異常時の荷重状態にあたる。異常時の荷重に対するトンネルの設計は、側方土圧に対する荷重係数を1.0以下の値にしてトンネルを曲げ卓越の状態にするのが安全側の設計であると考えた。また、既往のトンネルの変形事例や東京都内における地盤調査データの統計値をもとに、側方土圧に対する荷重係数の下限値を提案した。

第4章は、各種荷重条件下での設計の合否判定基準になる耐荷性能、変形性能、止水性能および耐久性能の限界値と安全係数とを示した章である。公的な基準類に定めがない限界値の算定方法と安全係数とを提案し、その根拠について論じている。まず、載荷試験結果をもとに、セグメント本体部および継手部の曲げに対

する部材係数について定量的な値を提案した．次に同じ載荷試験結果をもとに，継手部がコンクリートでせん断破壊する場合の耐力算定式と部材係数とについて提案を行った．また，継手部の変形性および止水性の照査に対して，既往のシールド工事における継手部の目違い量と目開き量の統計値をもとに，それらの限界値の考え方を示した．

第5章ではすべての荷重条件に対して，精度よく応答値を算定できる構造解析モデルについて論じている．シールドトンネルは多くのセグメントと継手から構成される構造物であり，設計用の応答値はそれらの力学的な状況を再現できる構造解析モデルが必要となる．このことから，はり-ばねモデル計算法を標準解析モデルとし，この解析モデルの高精度化を検討した．具体的には載荷試験結果をもとにして，セグメント継手およびリング継手に関する精度の高いモデルを提案した．また，これらの継手モデルを用いたはり-ばねモデルによる計算を行い，載荷試験結果と比較して，その解析精度を検証した．

第6章は施工時荷重の照査方法について論じた章である．まず，既往工事の施工中に生じたセグメントの損傷を調査し，既往のシールド工事で得られたひび割れの実績から，照査すべき荷重状態として，ジャッキ推力およびテールシール圧が想定される施工時の状態を検討した．次に，ジャッキ推力については，隣接するセグメントの組立状態に目違いや目開きなどがない場合とある場合とに分けて検討した．それらがない場合は模型実験結果をもとに照査式と限界値とを示した．目違いや目開きなどある場合は，実工事におけるそれらの程度と模型実験における損傷の状況との比較から，設計施工上の留意事項を示した．また，テールシール圧による施工時状態に関しては，既往の工事現場における計測結果と構造計算の結果とを比較勘案して，セグメントの損傷に対して品質を保証する上での設計の考え方を提案した．

第7章では耐久性の照査方法について具体的な設計方法とその根拠について論じている．まず，首都圏にある多くの地中送電用トンネルの維持管理データをもとに，鉄筋の腐食，ひび割れおよび漏水についての全体的な劣化の傾向を分析した．次に，シールドトンネルの内空側の詳細な劣化調査を行い，鉄筋が腐食する原因について分析し，これをもとにかぶりとひび割れがトンネルの耐久性を保証する重要な設計の検討項目であることを指摘した．最後に，耐久性を保証するかぶりの構造細目とひび割れ幅の照査方法とを提案している．

第8章はシールド工事の各種検査基準と性能照査型設計法との整合について論じた章である．設計法の変更に伴って変更になるシールド工事の検査項目を整理し，とくにジャッキ推力試験の合格値やボルトの締付けトルク等についての管理上の注意点を示している．

第9章は結論であり，本研究で得られた知見をまとめている．